

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 4 日現在

機関番号：34315

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24107002

研究課題名(和文)光捕集機能を有する人工光合成システム

研究課題名(英文)Artificial photosynthetic systems with light-harvesting ability

研究代表者

民秋 均(TAMIAKI, Hitoshi)

立命館大学・生命科学部・教授

研究者番号：00192641

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 115,700,000円

研究成果の概要(和文)：褐・珪・藍藻や紅・緑色光合成細菌などの天然光合成生物における光捕集アンテナ部の超分子構造を、分子レベルで解明しつつ、それらの励起エネルギー伝達・移動機能を、超高速分光を駆使して明らかにした。この成果を踏まえて、天然・人工クロロフィルやカロテノイドの集積体を利用して、高効率な光収穫・励起子伝達・エネルギー移動が可能な人工光合成アンテナ系を創製した。さらに、このような人工光合成アンテナ系と化学エネルギーへの変換系との有機的な結合を、メソポーラス有機シリカも利用しつつ開発した。

研究成果の概要(英文)：Supramolecular structures of light-harvesting antenna systems in phototrophs including brown algae, diatoms, cyanobacteria, purple bacteria, and green bacteria were elucidated and their excited energy migrating and transferring processes were revealed by various spectroscopies. Based on the above investigation, artificial photosynthetic antenna systems were constructed using natural and synthetic chlorophylls and carotenoids. Combination of the artificial antennas with energy conversion moieties producing high energy compounds (hydrogen, carbon monoxide, etc.) were performed on several solids containing mesoporous organosilica to afford artificial photosynthetic systems.

研究分野：化学

キーワード：生物物理 超分子化学 ナノ材料 光物性 バイオテクノロジー

1. 研究開始当初の背景

光合成初期過程では、太陽からの光エネルギーの吸収とその励起エネルギーの伝達、ならびにそのエネルギーによる電子移動反応が行われる。これらのエネルギー変換反応は、光化学系と呼ばれている器官で行われ、前者はアンテナ部で、最後の反応は反応中心部で行われる。光合成アンテナ部は光を集めているので、光収穫部もしくは光捕集部とも呼ばれている。これらの器官の(超)分子構造は、X線結晶構造解析法を利用して精力的に行われており、様々な形式のものがある程度のレベル(分解能)で解明されていた。反応中心部は種類が多くないこともあってかなりその構造は解明されてきているが、アンテナ部はその多様性から完全な解明には至っているものは少なく、アンテナ部が、反応中心部の回りに配置されて、効率的な光エネルギー変換を達原子レベルでの構造解析が望まれていた。

太陽光のエネルギー密度は低く、その照射も断続的であるので、光を収穫するアンテナ部が、反応中心部の回りに配置されて、効率的な光エネルギー変換を達成している。太陽光は、主としてペリフェラルアンテナ部で吸収され、その励起エネルギーは、コアアンテナ部に伝達され、最終的に、コアアンテナ部から反応中心部に伝達される。コアアンテナと反応中心は、複合体として機能しており、その量論比は常に一定であるが、ペリフェラルアンテナは、環境に応じてその大きさや量を変化させている。

光合成アンテナ部は通常、光を吸収する多数の色素分子とオリゴペプチドとの複合体であるが、緑色光合成細菌のペリフェラルアンテナには色素分子だけで構成されているものもあることが、研究代表者のこれまでの研究によって判ってきていた。

2. 研究の目的

天然光合成系のペリフェラルアンテナ部を中心に、原子レベルで構造が未解明なものについては、結晶構造解析によって構造解明を行いつつ、その励起エネルギー伝達・移動機能を超高速分光を駆使して明らかにする。この成果を踏まえて、天然・人工クロロフィルやカロテノイドの集積体を利用して、高効率な光収穫・励起子伝達・エネルギー移動が可能な人工光合成アンテナ系を創製し、化学エネルギーへの変換系との有機的な結合法を、メソポーラス有機シリカも利用しつつ開発する。さらに、コアアンテナ部についても同様の手法を展開して、検討を行っていく。

3. 研究の方法

様々な光合成生物(変異体を含む)を培養して、それらの多様な光収穫アンテナ部を、ペリフェラルアンテナ部を中心に単離精製する。これらの精製アンテナ部の超分子構造の解明を、各種分光法や高感度顕微鏡法

を用いて原子レベルで行う。また、精製アンテナ部の励起エネルギー伝達・移動機能を、超高速時間分解分光計測によって明らかにする。このような研究を基にして、天然産や(半)合成のクロロフィル類やカロテノイド類の集積体を利用して、高効率な光収穫・励起子伝達・エネルギー移動が可能な人工光合成アンテナ系を創製する。このような人工光合成アンテナ超分子系と、化学エネルギーへの変換が可能な系との有機的な結合法を、メソポーラス有機シリカも利用しつつ開発する。さらに、コアアンテナ部についても同様の手法を展開して、検討を行っていく。

4. 研究成果

(1) 褐藻のアンテナ系におけるエネルギー移動系の解明: フェムト秒時間分解吸収分光により、褐藻の一種であるオキナワモズクから単離したフコキサンチン(Fx)-クロロフィル(Chl) *a/c* 蛋白質(光捕集アンテナ)における Fx から Chl *a* への高効率(90%)な一重項エネルギー伝達を実現するために、Fx の最低励起一重項(S_1)状態に結合した分子内電荷移動励起状態(ICT)状態が重要な役割を果たしていることを明らかにした(図1、引用文献)。

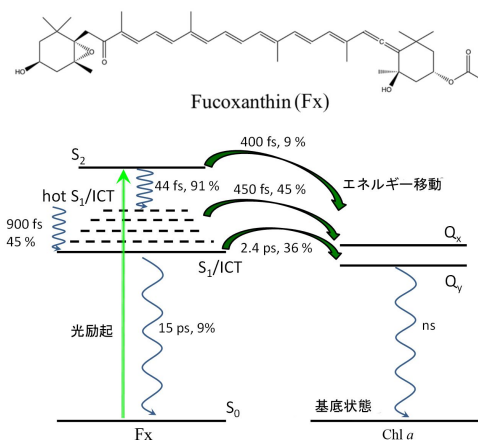


図1. Fx*→Chl *a* での励起エネルギー移動

(2) 紅色細菌のアンテナ系におけるエネルギー移動系の解明: 紅色光合成細菌由来の LH1 に海洋藻類由来の Fx を再構成することにより、世界で初めて成功した。フェムト秒時間分解分光測定を行うことにより、再構成した Fx には、B880 のバクテリオクロフィル(BChl) *a* へ高効率にエネルギー伝達する結合サイト(図2右)と、エネルギー伝達を全く行わない結合サイト(図2左)の2種類が存在することを明らかにした。このエネルギー伝達では、励起エネルギーの83%が Fx の S_1 状態に結合した ICT 状態を経由していることも分かった(引用文献)。

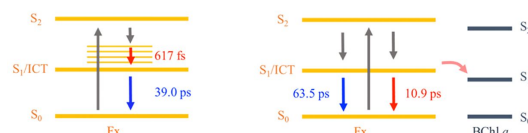


図2. Fx*→BChl *a* での励起エネルギー移動

(3) 7番目の細菌型クロロフィルの発見：これまでその所在が不明であった7番目の細菌型クロロフィル(葉緑素)が、生体から発見された(引用文献)。

この新種のクロロフィルは、その分子構造が約40年前に予想されて、BChl *f* という名前が予約されていたが、これまで生体からは見つかっていなかった。今回、光合成を行う緑色硫黄細菌 *Chlorobaculum limnaeum* の変異体に BChl *f* が蓄積されることが見出され、それらがクロロソームと呼ばれるアンテナ系で光合成に関与していることが証明された(図3)。これは、BChl *g* 以来約30年ぶりの発見であり、これで BChl *a* から *g* までの全ての細菌型クロロフィル7種類が全て発見されたことになる。

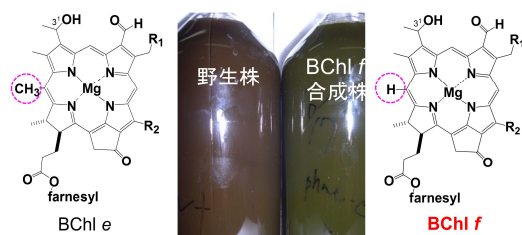


図3 . BChl *e* と *f* の分子構造式とそれらを生産する緑色光合成細菌の培養体

今回の発見は、光合成に関わる色素分子の分子進化を考える上で大変重要であり、天然の光合成の機能を分子のレベルで明らかにするばかりでなく、人工光合成システムの開発にも弾みがつくものになる。特に、BChl *f* は *Chlorobaculum limnaeum* の野生株がもつ BChl *e* よりも短波長側に吸収ピークをもち、これは太陽光で光子量が最も多い波長に大きく差し掛かることから、より高効率な人工アンテナ系の開発に有用であると考えられる。

(4) クロロゾーム型自己会合体による人工光捕集アンテナの構築：クロロゾーム型で自己会合するクロリン(C)型とポルフィリン(P)型のモデル分子と、PやCやバクテリオクロリン(B)骨格を有するクロロフィルヘテロダイマーを合成した。自己会合型モデル分子とその1%(mol/mol)量のヘテロダイマーをテトラヒドロフランに溶かし、99倍量のヘキサンを加えて、サンプル溶液を調製した。この溶液中でモデル分子の自己会合体を Soret 帯(C型では 450 nm; P型では 470 nm)で選択的に光励起し、その蛍光発光スペクトルを測定した。C型モデルとC-B型ダイマーを混合すると、その蛍光発光極大はB部に基づく826 nmで観測された。同様の発光挙動が、C型モデルとP-B型ダイマーを混合した時にも観測された。C型モデルとC-B型ダイマーを混合した時では、その蛍光発光極大はB部に基づく761と788 nmで観測された。C型モデルとP-Bを混合した時でも同様の蛍光発光極大値が観測された。本系のB部の蛍光発光挙動は、C型やP型モデルの自己会合体との相互作用

で変化することがわかった。これらの蛍光発光は、その励起スペクトルとC型やP型モデル自己会合体の吸収スペクトルとの一致から、自己会合体からB部への励起エネルギー移動によることが確認された。モデル分子によるクロロゾーム型自己会合体(ナノチューブ型超分子構造体：引用文献)に合成クロロフィルヘテロダイマーを連結することで、ヘキサン中での人工光捕集アンテナ系の構築に成功した(図4)。

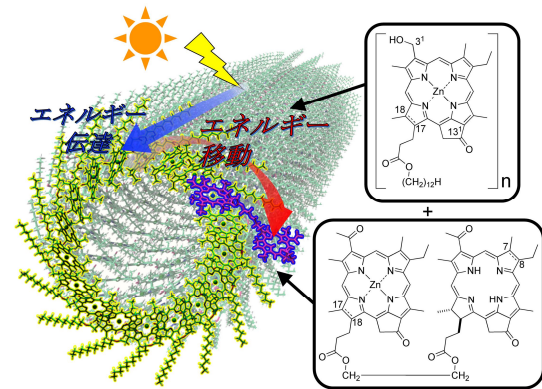


図4 . クロロゾーム型人工光捕集アンテナ系

このような人工光合成アンテナ系は、ガラスなどの基板でも構築することが可能であり、エネルギー変換系との有効な連結によって、光収穫系を有する人工光合成系の創製にいたると期待される。

(5) 光捕集アンテナと連動した CO₂ 還元光触媒系の構築：既にメソポーラス有機シリカ(PMO)が優れた光捕集アンテナ機能を有することを見出していたが、その細孔内に CO₂ 還元能を有する Ru-Re 二核錯体を固定することで、アンテナと連動した CO₂ 還元光触媒系を構築できた(引用文献)。蛍光スペクトルから、骨格中のアクリドンから Ru-Re 錯体への効率的なエネルギー移動が確認された。CO₂ 還元反応を評価したところ、アンテナ機能のないメソポーラスシリカ(MCM-41)を使用した場合と比較して、活性の大幅な増強が観察され、アクリドン-PMOによるアンテナ効果を反応においても確認できた(図5)。これは、人工のアンテナ物質と物質変換系を連動した数少ない成功例である。

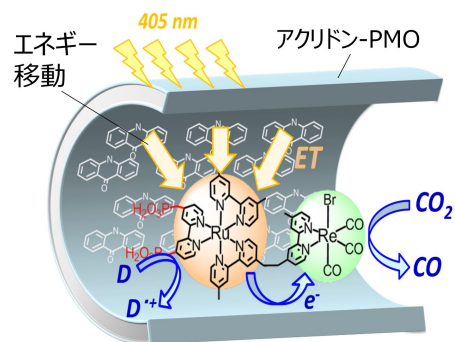


図5 . PMO 中での CO₂ 光還元

(6)水の酸化反応に関する固体分子光触媒系の構築：分子系光触媒に幅広く利用されている光増感剤の $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ を細孔壁内に高密度に導入した PMO の合成に成功した。これまで、Ru 錯体は分子リンカーにより細孔空間内に固定されていたが、導入できる Ru 錯体の量に限界があることや、細孔内に突出した Ru 錯体が基質の拡散を阻害するという問題があった。Ru 錯体を細孔壁内の組み込むことで、これらの課題が克服された。Ru 錯体の導入量は最大で 0.36 mmol/g に達した。この Ru-PMO は、細孔表面に触媒を担持することで、種々の固体分子光触媒として利用できる。水の酸化触媒である酸化イリジウム(IrO_x)を光酸化法で析出させたところ、450 nm の可視光の照射下で、水から酸素が効率的に生成することを見出した(図 6、引用文献)。見掛けの反応量子収率は、17.3%と高い値を示した。一方、白金粒子を担持した場合は、水からの水素の生成が確認された。Ru-PMO を固体光増感剤として用いることで、種々の固体分子光触媒の構築が期待される。

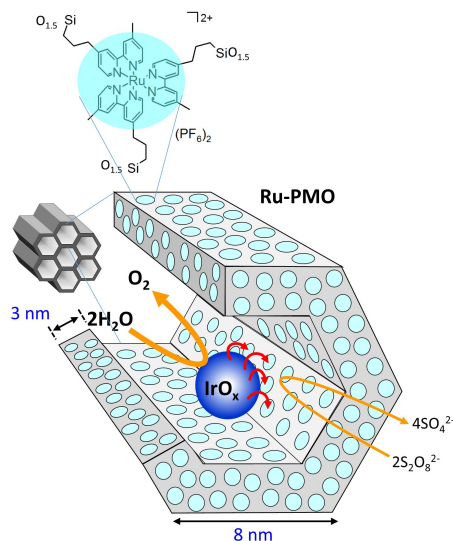


図 6 . PMO 中での H_2O 光酸化

< 引用文献 >

D. Kosumi, M. Kita, R. Fujii, M. Sugisaki, N. Oka, Y. Takaesu, T. Taira, M. Iha, and H. Hashimoto, "Excitation energy-transfer dynamics of brown algal photosynthetic antennas," *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **3**, 2659–2664 (2012); DOI:10.1021/jz300612c

N. Yukihiro, Y. Sugai, M. Fujiwara, D. Kosumi, M. Iha, K. Sakaguchi, S. Katsumura, A. T. Gardiner, R. J. Cogdell, and H. Hashimoto, "Strategies to enhance the excitation energy-transfer efficiency in a light-harvesting system using the intramolecular charge transfer character of carotenoids," *Faraday Discussions*, in press (2017); DOI:10.1039/c6fd00211k

J. Harada, T. Mizoguchi, Y. Tsukatani, M.

Noguchi, and H. Tamiaki, "A seventh bacterial chlorophyll driving a large light-harvesting antenna," *Scientific Reports* **2**, 671 (2012); DOI:10.1038/srep00671

S. Shoji, T. Ogawa, T. Hashishin, S. Ogasawara, H. Watanabe, H. Usami, and H. Tamiaki, "Nanotubes of biomimetic supramolecules constructed by synthetic metal chlorophyll derivatives," *Nano Letters*, **16**, 3650–3654 (2016); DOI:10.1021/acs.nanolett.6b00781

Y. Ueda, H. Takeda, T. Yui, K. Koike, Y. Goto, S. Inagaki, and O. Ishitani, "A visible-light harvesting system for CO_2 reduction using a $\text{Ru}^{\text{II}}\text{-Re}^{\text{I}}$ photocatalyst adsorbed in mesoporous organosilica," *ChemSusChem*, **8**, 439–442 (2015); DOI:10.1002/cssc.201403194

H. Takeda, M. Ohashi, Y. Goto, T. Ohsuna, T. Tani, and S. Inagaki, "A versatile solid photosensitizer: periodic mesoporous organosilicas with ruthenium tris(bipyridine) complexes embedded in the pore walls," *Advanced Functional Materials*, **26**, 5068–5077 (2016); DOI:10.1002/adfm.201601587

5 . 主な発表論文等

(雑誌論文)(計183件)

Y. Sun, X.-F. Wang, G. Chen, C.-H. Zhan, O. Kitao, H. Tamiaki, S. Sasaki, "Near-infrared absorption carboxylated chlorophyll-*a* derivatives for biocompatible dye-sensitized hydrogen evolution," *Int. J. Hydrogen Energy*, **42**, in press (2017), 査読有

Y. Kuramochi, M. Sekine, K. Kitamura, Y. Maegawa, Y. Goto, S. Shirai, S. Inagaki, H. Ishida, "Photocatalytic CO_2 reduction by bipyridyl periodic mesoporous organosilica (BPy-PMO) containing two different ruthenium complexes as photosensitizing and catalytic sites," *Chem. Eur. J.*, **23**, in press (2017), 査読有, 10.1002/chem.201701466

S. Matsubara, S. Shoji, H. Tamiaki, "Self-aggregation of synthetic chlorophyll-*c* derivative and effect of C17-acrylate residue on bridging green gap in chlorosomal model," *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **340**, 53–61 (2017), 査読有, 10.1016/j.jphotochem.2017.02.021

T. Mizoguchi, Y. Kinoshita, J. Harada, H. Tamiaki, "Organo-gelation of natural bacteriochlorophyll-*c* in carbon tetrachloride: dependence upon the stereochemistry at the 3'-position and the alkyl substituents at the 8-position," *ChemPlusChem*, **82**, 595–597 (2017), 査読有, 10.1002/cplu.201600494

H. Watanabe, Y. Kamatani, H. Tamiaki, "Coordination-driven dimerization of zinc

- chlorophyll derivatives possessing a dialkyl-amino group," *Chem. Asian J.*, **12**, 759–767 (2017), 査読有, 10.1002/asia.201700015
- D. Kosumi, T. Kajikawa, K. Sakaguchi, S. Katsumura, H. Hashimoto, "Excited state properties of β -carotene analogs incorporating a lactone ring," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19**, 3000–3009 (2017), 査読有, 10.1039/c6cp06828f
- K. Kim, K. Tsuji, Y. Kinoshita, T. Miyatake, H. Tamiaki, "Synthesis of monovinyl- and divinyl-chlorophyll analogs and their physical properties," *Tetrahedron*, **73**, 313–321 (2017), 査読有, 10.1016/j.tet.2016.12.003
- S. Shoji, T. Mizoguchi, H. Tamiaki, "In vitro self-assemblies of bacteriochlorophylls-*c* from *Chlorobaculum tepidum* and their supramolecular nanostructures," *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **331**, 190–196 (2016), 査読有, 10.1016/j.jphotochem.2015.11.003
- M. Teramura, J. Harada, H. Tamiaki, "In vitro stereospecific hydration activities of the 3-vinyl group of chlorophyll derivatives by BchF and BchV enzymes involved in bacteriochlorophyll *c* biosynthesis of green sulfur bacteria," *Photosynth. Res.*, **130**, 33–45 (2016), 査読有, 10.1007/s11120-016-0220-7
- S. Matsubara, M. Kunieda, A. Wada, S. Sasaki, H. Tamiaki, "Visible and near-infrared spectra of chlorosomal zinc chlorin self-aggregates dependent on their peripheral substituents at the 8-position," *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **330**, 195–199 (2016), 査読有, 10.1016/j.jphotochem.2016.07.028
- H. Tamiaki, K. Mizutani, S. Sasaki, T. Tatebe, "Rotational isomerization of 3-substituents in synthetic chlorophyll derivatives," *Tetrahedron*, **72**, 6626–6633 (2016), 査読有, 10.1016/j.tet.2016.08.079
- J. R. Reimers, M. Biczysko, D. Bruce, D. F. Coker, T. J. Frankcombe, H. Hashimoto, J. Hauer, R. Jankowiak, T. Kramer, J. Linnanto, F. Mamedov, F. Muh, M. Ratsep, T. Renger, S. Styring, J. Wan, Z. Wang, Z. Y. Wang-Otomo, Y. X. Weng, C. Yang, J. P. Zhang, A. Freiberg, E. Krausz, "Challenges facing an understanding of the nature of low-energy excited states in photosynthesis," *Biochim. Biophys. Acta*, **1857**, 1627–1640 (2016), 査読有, 10.1016/j.bbabi.2016.06.010
- A. Modak, K. Yamanaka, Y. Goto, S. Inagaki, "Photocatalytic H₂ evolution by Pt-loaded 9,9'-spirobifluorene-based conjugated microporous polymers under visible-light irradiation," *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **89**, 887–891 (2016), 査読有, 10.1246/bcsj.20160105
- H. Tamiaki, K. Tsuji, K. Kim, T. Miyatake, "Preparation of mono-vinylated and formylated chlorophyll derivatives and their optical properties," *Tetrahedron*, **72**, 4368–4376 (2016), 査読有, 10.1016/j.tet.2016.06.001
- Y. Kinoshita, Y. Kitagawa, H. Tamiaki, "Enhancement of light absorption ability of synthetic chlorophyll derivatives by conjugation with difluoroboron diketone group," *Chem. Eur. J.*, **22**, 9996–10001 (2016), 査読有, 10.1002/chem.201601882
- X. Liu, Y. Maegawa, Y. Goto, K. Hara, S. Inagaki, "Heterogeneous catalysis for water oxidation by an iridium complex immobilized on bipyridine-periodic mesoporous organosilica," *Angew. Chem. Int. Ed.*, **55**, 7943–7947 (2016), 査読有, 10.1002/anie.201601453
- H. Tamiaki, K. Tsuji, M. Kuno, Y. Kimura, H. Watanabe, T. Miyatake, "Synthesis of chlorophyll-*a* derivatives methylated in the 3-vinyl group and their intrinsic site energy," *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, **26**, 3034–3037 (2016), 査読有, 10.1016/j.bmcl.2016.05.008
- H. Tamiaki, Y. Kimura, H. Watanabe, T. Miyatake, "Synthesis of methyl pyropheophorbide-*d* derivatives possessing the 3-acetyl groups and their electronic absorption spectra," *Tetrahedron*, **72**, 3477–3489 (2016), 査読有, 10.1016/j.tet.2016.04.074
- Y. Tsukatani, T. Mizoguchi, J. Thweatt, M. Tank, D. A. Bryant, H. Tamiaki, "Glycolipid analyses of light-harvesting chlorosomes from envelope protein mutants of *Chlorobaculum tepidum*," *Photosynth. Res.*, **128**, 235–241 (2016), 査読有, 10.1007/s11120-016-0228-z
- M. Teramura, J. Harada, T. Mizoguchi, K. Yamamoto, H. Tamiaki, "In vitro assay of BciC showing C13²-demethoxycarbonylase activity requisite for biosynthesis of chlorosomal chlorophyll pigments," *Plant Cell Physiol.*, **57**, 1048–1057 (2016), 査読有, 10.1093/pcp/pcw045
- ②① M. Xu, Y. Kinoshita, S. Matsubara, H. Tamiaki, "Synthesis of chlorophyll-*c* derivatives by modifying natural chlorophyll-*a*," *Photosynth. Res.*, **127**, 335–345 (2016), 査読有, 10.1007/s11120-015-0190-1
- ②② H. Tamiaki, K. Tsuji, S. Machida, M. Teramura, T. Miyatake, "Transformation of carbonyl to vinylidene groups in the π -conjugated peripheral substituent of chlorophyll derivatives by Tebbe reagent," *Tetrahedron Lett.*, **57**, 788–790 (2016), 査読有, 10.1016/j.tetlet.2016.01.023
- ②③ D. Kosumi, T. Horibe, M. Sugisaki, R. J. Cogdell, H. Hashimoto, "Photoprotection mechanism of light-harvesting antenna complex from purple bacteria," *J. Phys. Chem. B*, **120**, 951–956 (2016), 査読有,

- 10.1021/acs.jpcc.6b00121
- ②4 H. Tamiaki, M. Teramura, Y. Tsukatani, "Reduction processes in biosynthesis of chlorophyll molecules: chemical implication of enzymatically regio- and stereoselective hydrogenations in the late stages of their biosynthetic pathway," *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **89**, 161–173 (2016), 査読有, 10.1246/bcsj.20150307
- ②5 K. Kim, M. Yoshizato, S. Sasaki, H. Tamiaki, "Synthesis of chlorophyll derivatives possessing an *S*-substituted thiomethyl group at the 3-position and their optical properties," *Tetrahedron*, **72**, 504–511 (2016), 査読有, 10.1016/j.tet.2015.11.066
- ②6 H. Watanabe, T. Mizoguchi, H. Tamiaki, "Stereoselective self-aggregation of 3¹-epimerically pure amino analogs of zinc bacteriochlorophyll-*d* in an aqueous micelle solution," *Photochem. Photobiol.*, **92**, 276–285 (2016), 査読有, 10.1111/php.12562

〔学会発表〕(計484件)

民秋 均、光捕集の最先端、日本化学会第97春季年会、2017年3月16日、慶應大学(神奈川県・横浜市)

H. Tamiaki, A. Wada, S. Shoji, Synthesis of zinc 20-substituted bacteriochlorophyll-*c* analogs and their chlorosomal self-aggregation, ICARP2017、2017年3月2日、立命館大学(京都府・京都市)

H. Hashimoto、Strategies to enhance the excitation energy-transfer efficiency in the light-harvesting system using the intramolecular charge transfer character of carotenoids、Faraday Discussion on Artificial Photosynthesis、2017年2月28日、立命館大学(京都府・京都市)

H. Tamiaki、Artificial light-harvesting antennas constructed by semisynthetic chlorophylls、2nd UK-Japan Solar Driven Fuel Synthesis Workshop、2016年6月23日、英国大使館(東京都・千代田区)

Y. Kinoshita, Y. Kitagawa, H. Tamiaki、Bridging the green gap by the conjugation of aromatic difluoroboron diketone group with chlorin ring at the C3 position、SNCP16、2016年6月19日、立命館大学(滋賀県・草津市)

H. Tamiaki, S. Shoji、Artificial light-harvesting antennas by chlorophyll self-aggregates、第6回フォーラム「人工光合成」、2016年3月24日、同志社大学(京都府・京田辺市)

H. Hashimoto、Quantum coherence between B800 and B850 assemblies of light-harvesting complex from purple bacteria observed by 5 fs optical pulses、Pacifichem 2015、2015年12月15日、ホノルル(米国)
H. Tamiaki, T. Tatebe、Photofunctional

chemistry of synthetic chlorophyll oligomers、ISPPCS 2015、2015年12月13日、マウイ(米国)

S. Inagaki、Light-harvesting molecular photocatalysis based on periodic mesoporous organosilicas、ICARP2014、2014年11月24日、淡路夢舞台国際会議場(兵庫県・淡路市)

〔図書〕(計30件)

塚谷祐介、民秋 均、稲垣伸二、NTS、光触媒/光半導体を利用した人工光合成—最先端科学から実装技術への発展を目指して—、2017年、400頁(22-30/114-121)

民秋 均、フロンティア生物無機化学、三共出版、2016年、548頁(261-286/313-314)
民秋 均、稲垣伸二、人工光合成：光エネルギーによる物質変換の化学、三共出版、2015年、357頁(17-35/216-234)

橋本秀樹、民秋 均、光合成のエネルギー利用と環境応用、CMC出版、2014年、308頁(1-21/285-294)

〔産業財産権〕

出願状況(計10件)

名称：バクテリオクロロフィルbの大量産生方法及び産生菌

発明者：塚谷祐介、民秋 均、原田二郎、藤田祐一、野亦次郎

権利者：学校法人立命館、学校法人久留米大学

種類：特許

番号：PCT出願2015-54552号

出願年月日：平成27年2月19日

国内外の別：国外

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ritsumei.ac.jp/se/rc/staff/tamiaki/lab.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

民秋 均 (Tamiaki, Hitoshi)

立命館大学・生命科学部・教授

研究者番号：00192641

(2) 研究分担者

稲垣 伸二 (INAGAKI, Shinji)

株式会社豊田中央研究所・稲垣特別研究室・室長・シニアフェロー

研究者番号：30374086

橋本 秀樹 (HASIMOTO, Hideki)

関西学院大学・理工学部・教授

研究者番号：50222211